

Ejercicio 1

Control de tonos y ecualizador de fase

duccion
ma

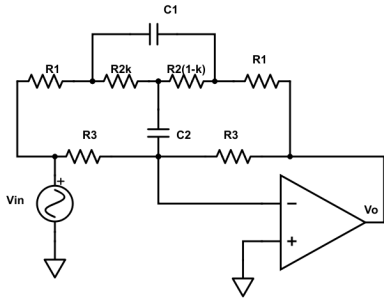


Figura 1.1: Circuito del control de tonos

$$A = \frac{K R_2}{C_1 S \left(\frac{1}{C_1 S} - R_2 (K - 1) + K R_2 \right)} \quad (1.1)$$

$$B = -\frac{R_2 (K - 1)}{C_1 S \left(\frac{1}{C_1 S} - R_2 (K - 1) + K R_2 \right)} \quad (1.2)$$

$$C = -\frac{K R_2^2 (K - 1)}{\frac{1}{C_1 S} - R_2 (K - 1) + K R_2} \quad (1.3)$$

1.1 Función transferencia

Para hallar la función transferencia $H(S) = \frac{V_o}{V_{in}}$ del circuito de la figura 1.1, se realizaron transformaciones estrella a triángulo y viceversa, reduciendo el circuito. Dichas transformaciones se realizaron con Matlab.

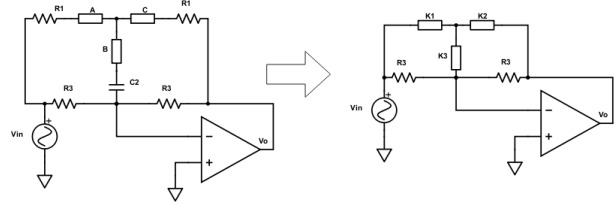


Figura 1.3: Agrupo impedancias en serie

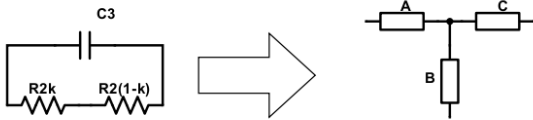


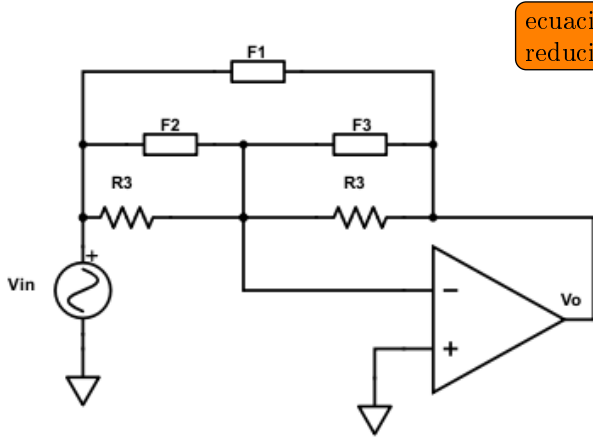
Figura 1.2: Transformación triángulo a estrella



Figura 1.4: Transformación estrella a triángulo

Reemplazando el circuito triángulo por el estrella, permito agrupar A con R_1 , C con R_1 y B con C_1 . Obteniendo un nuevo circuito estrella con las siguientes impedancias K_1 , K_2 y K_3 , tal como se observa en la figura 1.3.

Dicho circuito estrella se lo transformó a triángulo para de esta manera poder agrupar F_2 con R_3 y F_3 con R_3 (figura 1.5).



ecuacion
reducida

Si

$$-20C_2^2 K^2 R_2^2 R_1 S^2 + 20C_2^2 K R_1 R_2^2 + 10C_2^2 R_1^2 R_2 S^2 + 100C_2^2 R_1 R_2^2 S^2 \approx 100C_2^2 R_1 R_2^2 S^2 \quad (1.10)$$

La ecuacion xx posee la forma

$$H(S) = \frac{\left(\frac{S}{W_0}\right)^2 + \frac{S}{Q_Z W_0} + 1}{\left(\frac{S}{W_0}\right)^2 + \frac{S}{Q_Z W_0} + 1} \quad (1.11)$$

Dicha función transferencia corresponde a un circuito pasa banda de segundo orden, donde W_0 es la frecuencia central de la banda y Q_Z , Q_P , son los respectivos factores de calidad.

1.1.1 Frecuencia central

El coeficiente normalizado del término S^2 , tanto para el numerado como en el denominador (ecuación zz), es:

$$\frac{100C_2^2 R_1 R_2^2}{2R_1 + R_2} \quad (1.12)$$

Entonces por la ecuación 1.11 y 1.12, se obtiene la frecuencia central del pasa banda.

$$W_0^2 = \frac{1}{\text{ecuacion 1.12}} = \frac{2R_1 + R_2}{100C_2^2 R_1 R_2^2} \quad (1.13)$$

$$W_0 = \frac{\sqrt{2 + \frac{R_2}{R_1}}}{10C_2 R_2} \quad (1.14)$$

$$f_0 = \frac{\sqrt{2 + \frac{R_2}{R_1}}}{20\pi C_2 R_2} \quad (1.15)$$

1.1.2 Factores de calidad

A partir de los coeficientes normalizados de los términos de S , obtenemos los factores de calidad

Factor de calidad Q_Z

El coeficiente normalizado correspondiente al término de S del numerador, es

$$\frac{-C_2 K^2 R_2^2 - 9C_2 K R_2^2 + C_2 R_1^2 + 31C_2 R_1 R_2 + 10C_2 R_2^2}{2R_1 + R_2} \quad (1.16)$$

Entonces por la ecuación 1.11 y 1.16, se obtiene:

Figura 1.5: Agrupo impedancias en paralelo

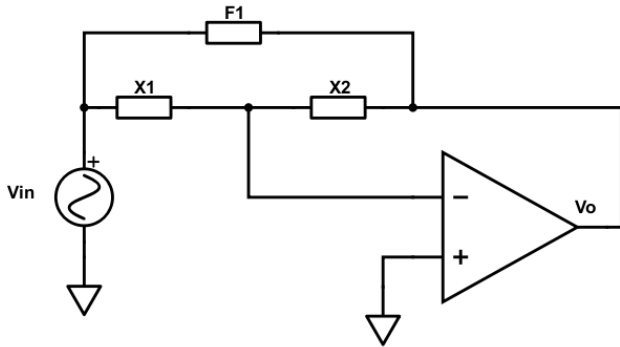


Figura 1.6: Circuito equivalente

Finalmente se obtiene el circuito de la figura 1.6. Considerando que el OpAmp se comporta idealmente y la corriente que circula internamente por la entrada del amplificador es cero, resulta la siguiente función transferencia:

$$H(S) = -\frac{X_2}{X_1} \quad (1.4)$$

Donde

$$X_1 = \quad (1.5)$$

$$X_2 = \quad (1.6)$$

Aplicando las siguientes condiciones de diseño sobre la función transferencia

$$R_3 \gg R_1 \quad (1.7)$$

$$R_3 = 10R_2 \quad (1.8)$$

$$C_1 = 10C_2 \quad (1.9)$$

Obtenemos

$$Q_Z = \frac{1}{W_0 \cdot \text{ecuacion1.16}} \quad (1.17)$$

$$Q_Z = \frac{(2R_1 + R_2) 10R_2}{(-K^2 R_2^2 - 9K R_2^2 + R_1^2 + 31R_1 R_2 + 10R_2^2) \sqrt{2 + \frac{R_2}{R_1}}} \quad (1.18)$$

Factor de calidad Q_P

El coeficiente normalizado correspondiente al termino de S del denominador, es

$$\frac{-C_2 K^2 R_2^2 + 11C_2 K R_2^2 + C_2 R_1^2 + 31C_2 R_1 R_2}{2R_1 + R_2} \quad (1.19)$$

Entonces por la ecuación 1.11 y 1.19, se obtiene:

$$Q_P = \frac{1}{W_0 \cdot \text{ecuacion1.19}} \quad (1.20)$$

$$Q_P = \frac{(2R_1 + R_2) 10R_2}{(-K^2 R_2^2 + 11K R_2^2 + R_1^2 + 31R_1 R_2) \sqrt{2 + \frac{R_2}{R_1}}} \quad (1.21)$$

Modulo de $H(f)$ en W_0

Definimos A_0 como:

$$A_0 \hat{=} |H(S = jW_0)| \quad (1.22)$$

Reemplazamos $S = jW_0$ en 1.11

$$A_0 = \frac{Q_P}{Q_Z} \quad (1.23)$$

$$A_0 = \frac{-K^2 R_2^2 - 9K R_2^2 + R_1^2 + 31R_1 R_2 + 10R_2^2}{-K^2 R_2^2 + 11K R_2^2 + R_1^2 + 31R_1 R_2} \quad (1.24)$$

Si $K = 0$

$$\begin{aligned} A_0(K = 0) &= \frac{R_1^2 + 31R_1 R_2 + 10R_2^2}{R_1^2 + 31R_1 R_2} \\ &= \frac{R_1(R_1 + 31R_2) + 10R_2^2}{R_1(R_1 + 31R_2)} \\ &\approx \frac{R_1 31 + 10R_2}{31R_1} \end{aligned} \quad (1.25)$$

$$A_0(K = 0) \approx \frac{3R_1 + R_2}{3R_1} \quad (1.26)$$

Si $K = 1$

$$\begin{aligned} A_0(K = 1) &= \frac{R_1^2 + 31R_1 R_2}{10R_2^2 + R_1^2 + 31R_1 R_2} \\ &\approx \frac{R_1 31}{10R_2 + 31R_1} \\ &\approx \frac{3R_1}{R_2 + 3R_1} \end{aligned} \quad (1.27)$$

$$A_0(K = 1) \approx \frac{3R_1}{3R_1 + R_2} \quad (1.28)$$

A partir de 1.26 y 1.28 obtenemos que

$$\frac{3R_1}{3R_1 + R_2} \leq A_0 \leq \frac{3R_1 + R_2}{3R_1} \quad (1.29)$$

Agrega
punto

1.2 Equalizador de 3 bandas

1.2.1 Espectro audible

Los seres humanos, pueden percibir un rango de frecuencias, desde 20Hz hasta 20KHz. Dicho rango depende de la salud auditiva de cada persona.

El espectro se puede dividir en tres partes, llamadas graves, medios y agudos.

- Tonos graves, frecuencias comprendidas entre 20Hz y 256Hz.
- Tonos medios, frecuencias comprendidas entre 256Hz y 2KHz.
- Tonos Agudos, frecuencias comprendidas entre 2KHz y 20KHz.

1.2.2 Elección de la frecuencia central

Como se trata de un ecualizador de tres bandas, se deben elegir tres frecuencias centrales para cada pasa banda. Consideramos que las frecuencias deben estar equiespaciadas en escala logarítmica, para lograr abarcar todo el espectro audible. Para ello utilizamos la media geométrica, $f_0 = \sqrt{f_{inicial} f_{final}}$. De esta manera calculamos las frecuencias de cada banda, representando los tonos graves, medios y agudos.

Etapas	Tonos	f_0
1	Graves	64Hz
2	Medios	716Hz
3	Agudos	6324Hz

Tabla 1.1: Frecuencias centrales

1.2.3 Ganancia en la frecuencia central - A_0

Los ecualizadores comerciales se construyen de 3 ganancias/atenuaciones en las frecuencias centrales de cada banda, de 6dB, 12dB y 18dB.

En este caso elegimos que nuestro ecualizador atenué o amplifique 6dB, para así evitar que el amplificador operacional sature.

Reemplazando el criterio de los 6dB en 1.29

$$\frac{3R_1 + R_2}{3R_1} = 2 \quad (1.30)$$

$$\frac{3R_1}{3R_1 + R_2} = 0.5 \quad (1.31)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones obtenemos

$$R_2 = 3R_1 \quad (1.32)$$

Reemplazando 1.32 en 1.15 y despejando, obtenemos una expresion para hallar C_2

$$C_2 = \frac{\sqrt{5}}{20\pi R_2 f_0} \quad (1.33)$$

A partir de este resultado, de las frecuencias de corte y de las condiciones de diseño ya mencionadas, se calcularon los componentes de cada etapa.

Etapa	R_1	R_2	R_3	C_1	C_2	f_0
1	1.6K Ω	5K Ω	50K Ω	1 μ F	100nF	71Hz
2	1.6K Ω	5K Ω	50K Ω	100nF	10nF	776Hz
3	1.6K Ω	5K Ω	50K Ω	12nF	1.2nF	6000Hz

Tabla 1.2: Componentes

1.2.4 Conexión de las etapas

Las etapas se podrían conectar de dos maneras, en cascada o en paralelo.

Cascada

La salida de una etapa se conecta a la entrada de la otra etapa. Si H_1 , H_2 y H_3 , son las funciones transferencia de cada etapa, entonces la función transferencia del sistema es $H = H_1 H_2 H_3$.

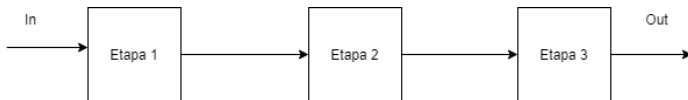


Figura 1.7: Esquema de conexión cascada

Paralelo

Las entradas de cada etapa se conectan juntas y las salidas también. Sin embargo las salidas se deben conectar juntas a través de por ejemplo un sumador.

En esta configuración la función transferencia del sistema es $H = H_1 + H_2 + H_3$.

Simulación

Se simulon ambas configuraciones cascada y paralelo.

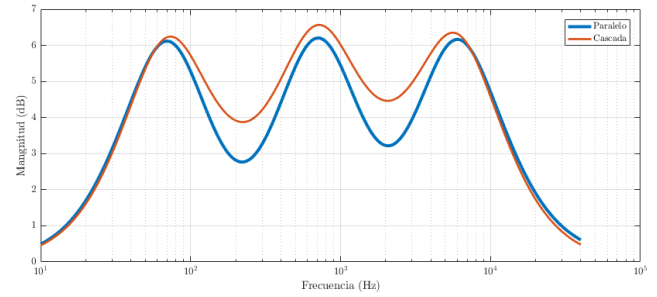


Figura 1.8: Maxima ganancia - magnitud

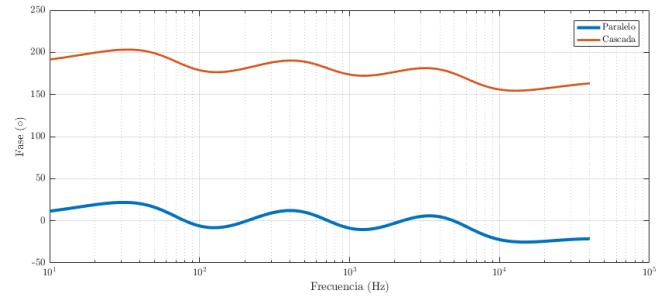


Figura 1.9: Maxima ganancia - fase

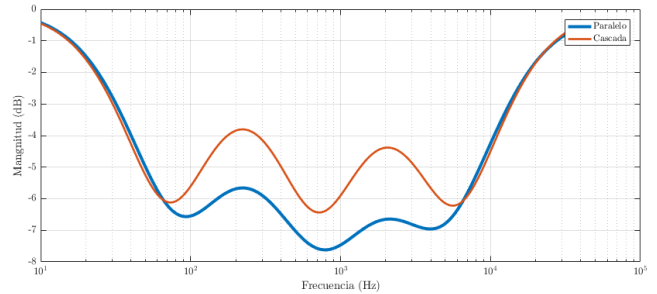


Figura 1.10: Maxima atenuación - magnitud

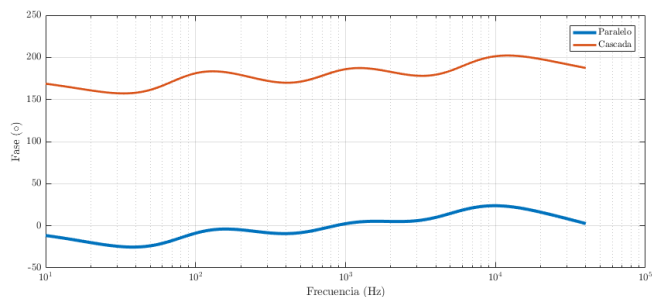


Figura 1.11: Maxima atenuación - fase

Como se observa en los gráficos, en la condición de máxima ganancia la amplitud de los sobre picos es mayor en paralelo y en máxima atenuación la máxima atenuación de los sobre picos corresponde a la configuración cascada.

Just-noticeable difference (JND)

Es la mínima cantidad de algo que el humano puede percibir, por lo menos en la mitad de los casos. En el caso del audio, la mínima variación perceptible es de 1dB.

Figura de ruido

El objetivo es determinar qué configuración es más susceptible al ruido. Los componentes, tanto pasivos como activos, generan ruido. En la conexión cascada, el ruido de cada etapa es amplificado por la etapa posterior, por ende posee más ruido que la configuración en paralelo.

Elección de topología

En cuanto al JND tanto el paralelo como serie, dependiendo si se encuentra en máxima ganancia o atenuación, tienen máxima amplitud, por ende no es criterio para elegir. El oído humano no puede percibir la diferencia de fase, por lo tanto no aporta a la elección de topología. Sobre el ruido, la configuración paralela tiene una leve ventaja sobre la cascada, sin embargo para realizarla se debe agregar un sumador, lo que complejiza el circuito. Por ende se eligió la topología cascada.

1.2.5 Realización de la placa

Se conectaron las tres etapas en cascada, se agregó una entrada de audio mono (Jack 3,5 mini plug) además de pines, también esto se hizo a la salida. En cuanto al amplificador operacional, se decidió utilizar tres TL081, debido a sus altas prestaciones en cuanto al slew rate, y ruido.

1.2.6 Mediciones

Se realizaron las siguientes mediciones al circuito:

- Respuesta en frecuencia a máxima ganancia.
- Respuesta en frecuencia a máxima atenuación.
- Respuesta en frecuencia si atenuar o ganar.
- Impedancia de entrada máxima y mínima.
- Impedancia de salida máxima y mínima.

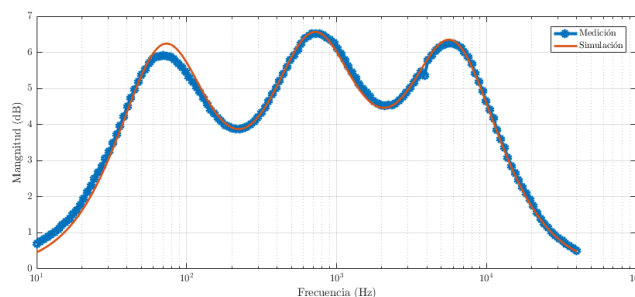


Figura 1.12: Máxima ganancia - magnitud

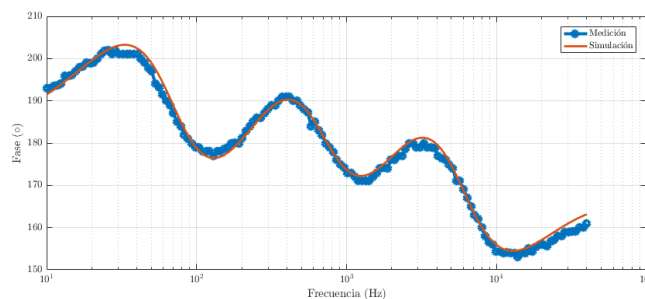


Figura 1.13: Máxima ganancia - fase

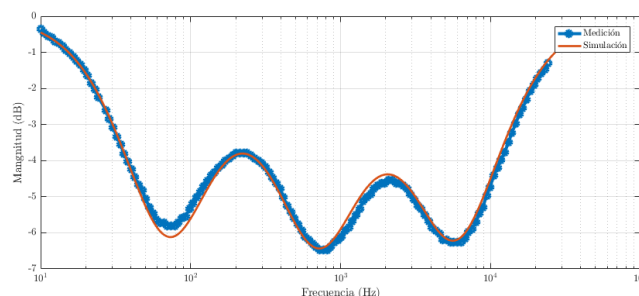


Figura 1.14: Máxima atenuación - magnitud

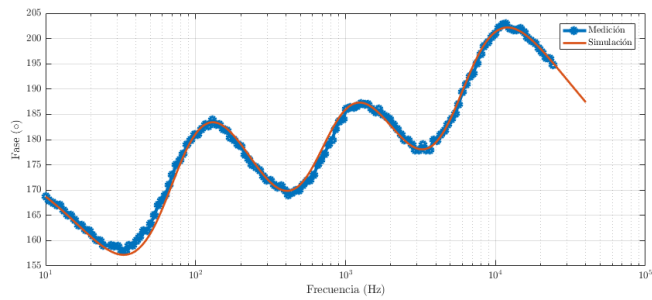


Figura 1.15: Maxima atenuación - fase

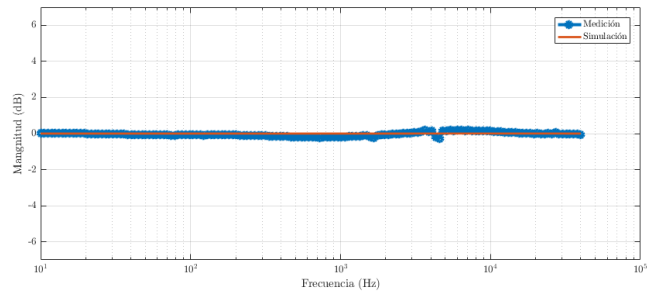


Figura 1.16: Sin ganancia ni atenuación - magnitud

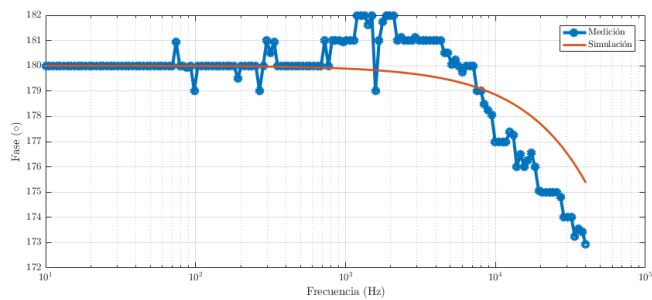


Figura 1.17: Sin ganancia ni atenuación - fase

Impedancia	Maxima	Minima
Entrada	$3.69\ K\Omega$	$1.584\ K\Omega$
Salida	8.122Ω	0.022Ω

Tabla 1.3: Frecuencias centrales

1.2.7 Conclusión

Se logró realizar el ecualizador de tres bandas, dicho circuito se comportó como era de esperarse en el rango de frecuencias audibles. Tal como se observan en las mediciones, las simulación y las mediciones ajustan perfectamente.